

УДК 669.295:621.762

**М. А. Герман<sup>\*</sup>, А. В. Бачеев, А. О. Жидович**

Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет),  
г. Москва

<sup>\*</sup>*ferrarigerman@gmail.com*

Научный руководитель – проф., д-р техн. наук С. В. Скворцова

## СТРУКТУРА И СВОЙСТВА ИЗДЕЛИЙ ИЗ ТИТАНОВОГО СПЛАВА, ПОЛУЧЕННЫХ ПРИ ПОМОЩИ 3D-ТЕХНОЛОГИЙ

В рамках данной работы было изучено влияние обратимого легирования водородом на преобразование структуры и свойства образцов из титанового сплава Ti–6Al–4V, полученных методом селективного лазерного сплавления (SLM).

*Ключевые слова:* титановый сплав, аддитивные технологии, порошковая металлургия, селективное лазерное сплавление, 3D-технологии, 3D-принтер, термическая обработка, термоводородная обработка.

**М. А. German, A. V. Bacheeva, A. O. Zhidovich**

## STRUCTURE AND PROPERTIES OF PRODUCTS MADE OF TITANIUM ALLOY OBTAINED BY 3D-MANUFACTURING

The effect of reversible hydrogen alloying on structure formation and properties in Ti–6Al–4V alloy samples obtained by selective laser melting (SLM) method was investigated in this work.

*Keywords:* titanium alloy, additive manufacturing, powder metallurgy, selective laser melting, 3D-technology, 3D-printer, thermohydrogen processing.

На первом этапе работы были изучены структура, твердость и плотность образцов в исходном состоянии после селективного лазерного сплавления (SLM): Металлографический анализ показал, что структура образцов представлена мартенситом  $\alpha'$ . Твердость образцов колеблется от 35 до 38 ед. HRC. Плотность, определенная методом гидростатического взвешивания, составила 4,42 г/см<sup>3</sup>.

На следующем этапе работы была изучена структура образцов после вакуумного отжига. Отжиг проводили в вакууме для предотвращения окисления. Для исследований было выбрано две температуры 820°C и 850°C. После отжига формируется структура, представленная  $\alpha$ -фазой, имеющей пластинчатую морфологию, «наследуемую» от исходной

структуры мартенсита, и небольшим количеством  $\beta$ -фазы. С повышением температуры отжига более четко выявляется  $\alpha$ -оторочка по границам  $\beta$ -зерен. Немного измельчить структуру удалось при помощи двухступенчатого вакуумного отжига. Твердость образцов составила 35 ед. HRC. Плотность образцов после проведения вакуумного отжига не изменилась.

Имея положительный опыт [1] влияния термоводородной обработки на структуру и свойства, на следующем этапе работы была оценена возможность преобразования структуры и управление свойствами 3D-образцов с помощью термоводородной обработки.

Наводороживающий отжиг 3D-образцов из сплава Ti–6Al–4V проводили до концентрации 0,6 % по массе при двух температурах: 850 °C, что соответствовало  $\beta$ -области, и 750 °C, что соответствовало  $(\alpha+\beta)$ -области после завершения процесса. Наводороживающий отжиг в  $(\alpha+\beta)$ -области был совмещён с вакуумным отжигом. Для этого образцы вначале нагревали в вакууме до 820 °C, выдерживали в течении 2 часов, а затем понижали температуру до 750 °C и начинали процесс наводороживания. После завершения поглощения водорода, образцы выдерживали при температуре наводороживающего отжига при равновесном давлении водорода в течение 3 часов для завершения диффузионных процессов. Охлаждение до комнатной температуры проводили со скоростью 1 К/с.

Введение в 3D-образцы 0,6 % водорода при температуре 850 °C с последующим охлаждением до комнатной температуры приводит к формированию  $\beta$ -структуры с небольшим количеством  $\alpha'$ -мартенсита (рис. 1, а, б).

Наводороживание в двухфазной области приводит к формированию трёхфазной  $(\alpha+\alpha_2+\beta)$ -структуры (рис. 1, в, г). Под действием водорода происходит перераспределение легирующих элементов между  $\alpha$ - и  $\beta$ -фазами, что создает условия для протекания в микрообъемах  $\alpha$ -фазы процессов упорядочения [2]. Это подтверждается появлением на дифрактограммах сверхструктурных рефлексов, характерных для  $\alpha_2$ -фазы (рис. 1, г). Так же следует отметить, что в структуре отчетливо видны участки с мартенситной структурой. (рис. 1, в). Данная картина может объясняться химической неоднородностью порошка.

Окончательной операцией термоводородной обработки является вакуумный отжиг. Он необходим не только для преобразования структуры, но и для снижения содержания водорода в сплаве до безопасных концентраций.

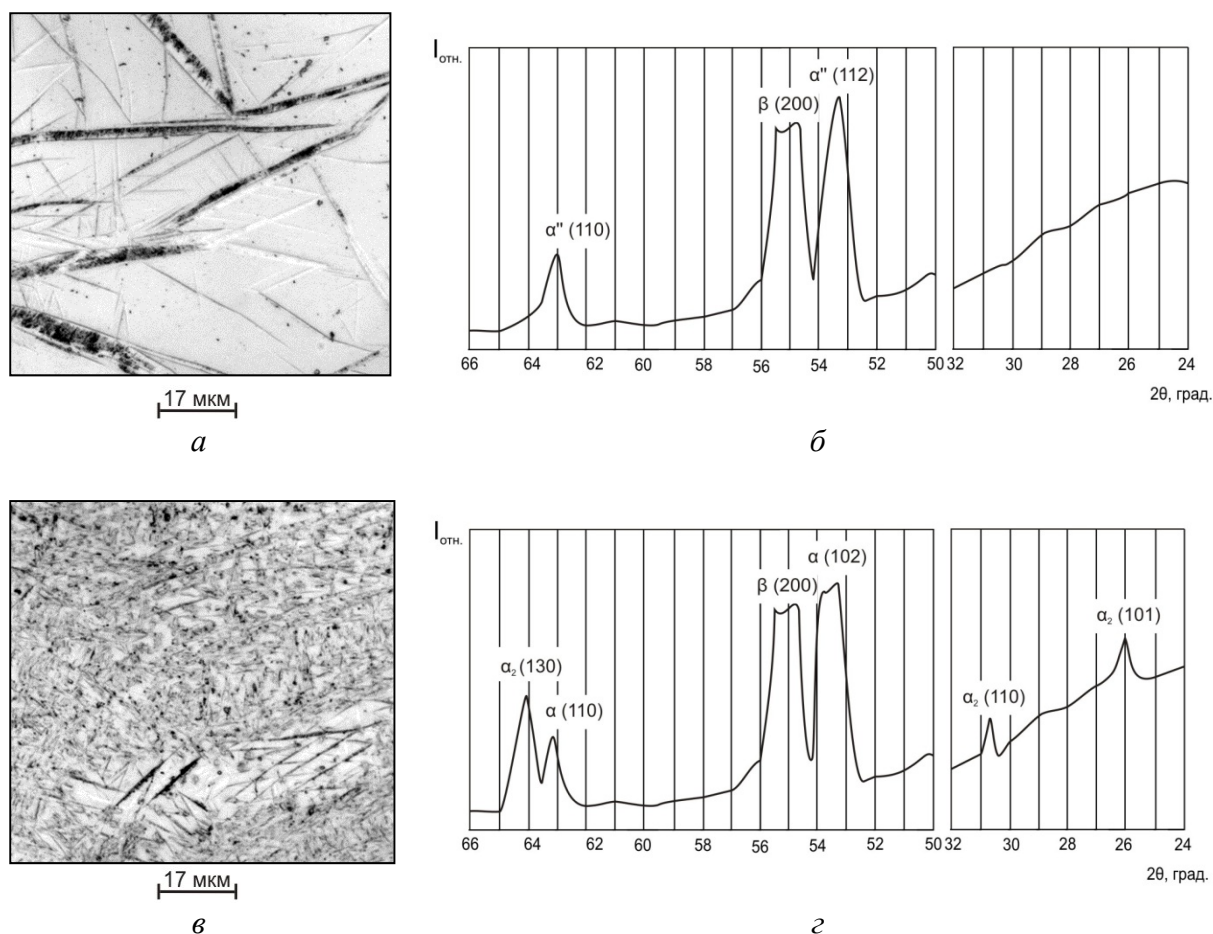


Рис. 1. Микроструктура и участки дифрактограмм 3D-образцов из сплава Ti–6Al–4V после наводороживающего отжига при температурах: *а, б* – 850 °С и *в, г* – 750 °С до концентрации 0,6 % Н

Для проведения вакуумного отжига было выбрано несколько режимов отжига:

- при температуре 820 °С, выдержка 4 часа;
- при температуре 625 °С, выдержка 8 часов
- при температуре 550 °С, выдержка 3 часа, нагрев до 820 °С, выдержка 4 часа.

Металлографический анализ показал, что образцы, наводороженные при температуре 850 °С, т. е. в  $\beta$ -области, после вакуумного отжига имеют  $(\alpha+\beta)$ -структуру. Так как после наводороживающего отжига в структуре присутствовал мартенсит, то при вакуумном отжиге  $\alpha$ -фаза наследует его пластинчатую морфологию (рис. 2). При ступенчатом и низкотемпературном вакуумном отжиге наблюдается измельчение структуры. Благодаря более низкой диффузионной подвижности основных легирующих элементов по сравнению с водородом при  $\beta \rightarrow \alpha$ -превращении процессы зарождения новых частиц  $\alpha$ -фазы преобладают над процессами

их роста. Структура после данных режимов значительно мельче (рис. 2, б, в) по сравнению со структурой после вакуумного отжига при 820 °С (рис. 2, а). Измельчение структуры приводит к увеличению твёрдости от 34 ед. HRC после вакуумного отжига при 820 °С до 39 ед. HRC после вакуумного отжига при 625 °С (рис. 2).

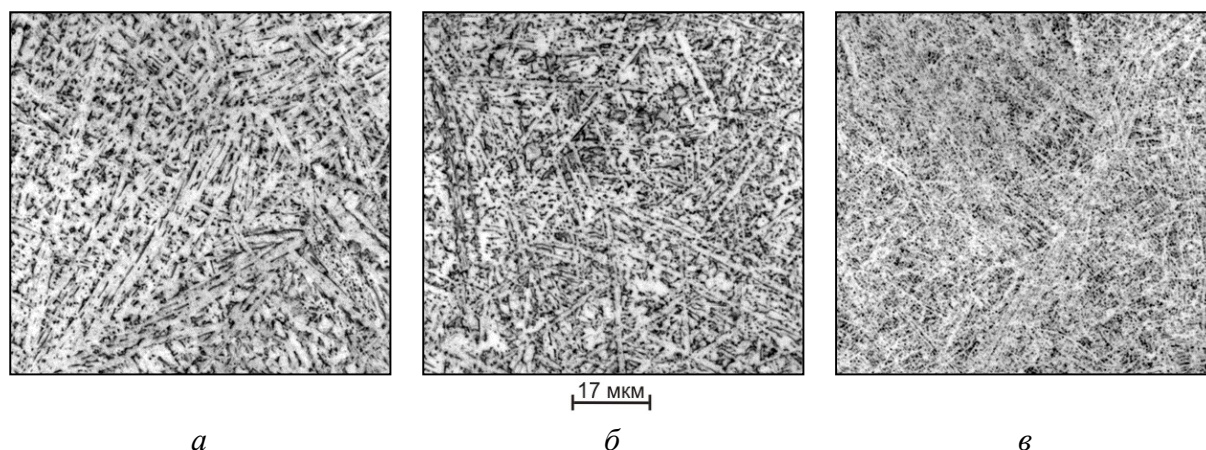


Рис. 2. Микроструктура 3D-образцов из сплава Ti–6Al–4V после наводороживающего отжига при 850 °С и последующего вакуумного отжига при температурах:  
а – 820 °С; б – 550 °С + 820 °С; в – 625 °С

Одноступенчатый отжиг при 820 °С и ступенчатый вакуумный отжиг образцов, наводороженных при 750 °С, т. е. в  $(\alpha+\beta)$ -области, приводит к формированию равновесной  $(\alpha+\beta)$ -структуры (рис. 3, а, б). После низкотемпературного вакуумного отжига при 625 °С формируется трёхфазная  $(\alpha_{\text{дег}}+\beta+\alpha_2)$ -структура. Формирующаяся структура существенно отличается от всех рассмотренных выше: отсутствует  $\alpha$ -«оторочка» и крупных пластин  $\alpha$ -фазы. Дисперсность структурных составляющих увеличивается с понижением температуры вакуумного отжига. Однако это практически не сказывается на значениях твёрдости, которая составляет 34–35 ед. HRC. Невысокая твёрдость 3D-образцов с дисперсной структурой (рис. 3, в) обусловлена тем, что вследствие перераспределения алюминия в процессе наводороживающего отжига в  $(\alpha+\beta)$ -области и средоточения его в частицах первичной  $\alpha$ -фазы, происходит обеднение им матрицы ( $\beta$ -фазы). Образующаяся при дегазации из обеднённой алюминием  $\beta$ -фазы  $\alpha$ -фаза имеет пониженное содержание алюминия. Таким образом, с одной стороны диспергация структуры должна приводить к увеличению твёрдости, с другой стороны, имеет место твёрдорастворное разупрочнение. Этим объясняются невысокие значения твёрдости.

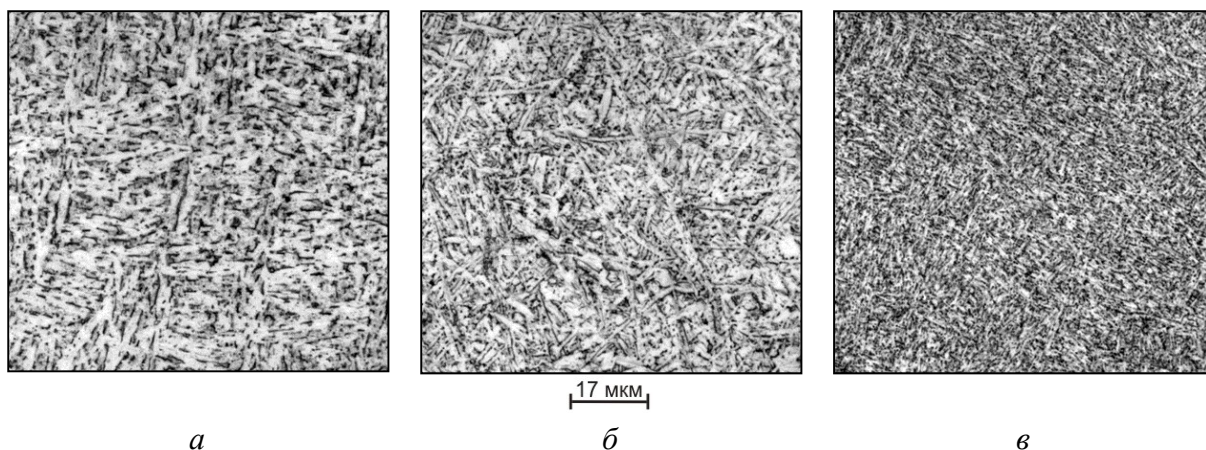


Рис. 3. Микроструктура 3D-образцов из сплава Ti–6Al–4V после наводороживающего отжига при 750 °С и последующего вакуумного отжига при температурах:  
*а* – 820 °С; *б* – 550 °С + 820°С; *в* – 625 °С

*Работа выполнена с использованием оборудования ресурсного центра коллективного пользования «Авиационно-космические материалы и технологии» МАИ.*

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Водородная технология титановых сплавов / А. А. Ильин [и др.]. Москва : «МИСИС», 2002. 392 с.
2. Ильин А. А. Механизмы и кинетика фазовых и структурных превращений в титановых сплавах / А. А. Ильин. Москва : Наука ,1994. 304 с.